

МОДУЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДИСПЕРСИИ
УЛЬТРАЗВУКА

В. А. Зверев

Описан метод непосредственного измерения дисперсии волн, основанный на изменении характера модуляции волны при ее распространении в диспергирующей среде. Приведены результаты экспериментов, поставленных с целью проверки метода и определения его возможностей при измерении дисперсии звука.

Изучение дисперсии упругих и электромагнитных волн в различных средах имеет большое значение для выяснения их структуры и механизма происходящих в них внутренних процессов. Исследованию дисперсии упругих и электромагнитных волн различных диапазонов частот посвящено очень большое количество работ. Однако вследствие малой чувствительности существующих методов измерения дисперсии до сих пор не удалось проверить существование ряда тонких дисперсионных явлений в акустике, предсказываемых теорией, а ряд утверждений об экспериментально наблюдаемых явлениях дисперсии вызывает серьезные сомнения [1].

Обычно величину дисперсии определяют сравнением результатов измерения фазовой скорости с на разных частотах ω . Очевидно, что при этом разброс значений c , обусловленный неточностью измерений, будет маскировать малую дисперсию, и, кроме того, наблюдаемые отличия значений c могут быть обусловлены не дисперсией, а небольшими изменениями исследуемой среды в процессе измерения.

Это обстоятельство поясняет необходимость разработки специальной методики для измерения дисперсии, свободной от ограничения существующих методов измерения. Ряд работ такого рода выполнен за последнее время американскими авторами [2,3]. Здесь описывается метод непосредственного измерения дисперсии [4,5], применимый как в случае упругих, так и электромагнитных волн, имеющий в принципе неограниченную чувствительность.

Будем характеризовать дисперсию величиной $D = \frac{d^2k}{d\omega^2}$, где $k = \omega/c$ — волновое число. Величину D назовем дисперсионным параметром. Легко видеть, что в отсутствие дисперсии $D = 0$. Нами разработан способ непосредственного измерения величины D , а следовательно, и дисперсии, основанный на изменении характера модуляции волны, распространяющейся в диспергирующей среде.

Прежде чем переходить к описанию метода, остановимся вкратце на некоторых свойствах модулированного колебания.

Рассмотрим колебание вида:

$$u = B(t) \sin [\omega_0 t + \Phi(t)] = A_0 \sin (\omega_0 t - \varphi_0) + A_1 \sin (\omega_1 t - \varphi_1) + A_2 \sin (\omega_2 t - \varphi_2), \quad (1)$$

где $\omega_{1,2} = \omega_0 \pm \Omega$; $\Omega \ll \omega_0$.

Вид модулирующих функций $B(t)$ и $\Phi(t)$ в (1) зависит от соотношений амплитуд A_0, A_1, A_2 и фаз $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$, причем последние входят

только в следующей комбинации:

$$\Theta = \varphi_0 - \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}. \quad (2)$$

Эта комбинация фаз оказывается единственной, инвариантной по отношению к изменению начала отсчета времени. Назовем ее фазовым инвариантом колебания (1). Согласно (1), величину $B^2(t)$ можно представить в виде

$$B^2(t) = M_0 + M_1 \cos(\Omega t + \alpha) + M_2 \cos(2\Omega t + \beta). \quad (3)$$

Будем считать, что при помощи квадратичного детектора и фильтра мы выделяем из колебания (1) гармоническое колебание с частотой модуляции Ω . Его амплитуда будет

$$M_1 = 2A_0 \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos 2\Theta}. \quad (4)$$

При изменении Θ , M_1 меняется от максимума $2A_0(A_1 + A_2)$ до минимума $2A_0(A_1 - A_2)$. В случае, если $A_1 = A_2$, величина M_1 проходит через нуль всякий раз, когда $\cos 2\Theta = -1$. Заметим, что при $A_1 = A_2 \ll A_0$ это условие соответствует фазовой, а условие $\cos 2\Theta = 1$ соответствует амплитудной модуляции колебания (1), т. е. изменение Θ ведет к смене фазовой модуляции амплитудной, и наоборот.

Пусть теперь излучатель, колеблясь по закону (1), излучает плоскую волну в положительном направлении оси x . Тогда в некоторой точке, отстоящей на расстоянии x от излучателя, фазы гармонических компонент (1) будут:

$$\varphi_1 = \varphi_{10} - k_1 x; \quad \varphi_2 = \varphi_{20} - k_2 x; \quad \varphi_0 = \varphi_{00} - k_0 x, \quad (5)$$

где φ_{i0} — фазы в точке расположения излучателя, $k_i = \frac{w_i}{c(w_i)}$ ($i = 0, 1, 2$).

Из (2) и (5) получим фазовый инвариант в точке x :

$$\Theta_x = \Theta_0 - \left(k_0 - \frac{k_1 + k_2}{2}\right) x. \quad (6)$$

Разложив величины k_i в ряд по степеням Ω в окрестности ω_0 и ограничившись членами с Ω^3 , имеем

$$\Theta_x = \Theta_0 - \frac{1}{2} D x \Omega^2. \quad (7)$$

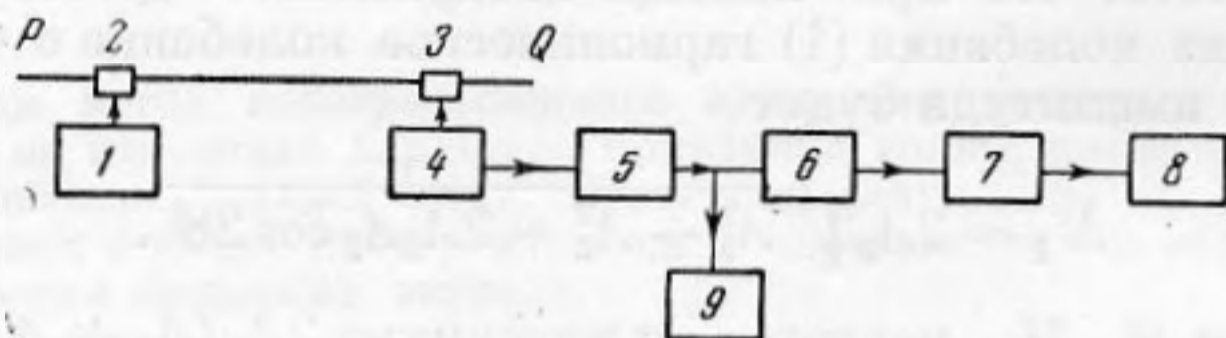
Из полученного равенства следует, что при наличии дисперсии в среде фазовый инвариант колебания будет изменяться по мере распространения волны. Из (4) и (7) следует, что расстояние между плоскостями, где характер модуляции одинаков, $L = 2\pi/D\Omega^2$. В принципе можно найти D , измерив L , но при малой дисперсии такое измерение затруднительно. В этом случае измерение дисперсии может быть осуществлено следующим путем. Будем изменять величину θ_0 на излучателе и наблюдать за величиной M_1 в двух точках среды, отстоящих на расстоянии d вдоль оси x . Разность значений θ_0 на входе, которые дают минимум M_1 в первой и второй точках наблюдения, даст изменение фазового инварианта в среде при распространении волны на расстояние d , по которому определяется D на основании (7). Точность измерения величины D определяется при этом той точностью, с которой можно констатировать наличие минимума M_1 . Это, в свою очередь, определяется только уровнем собственных шумов применяемой усилительной аппаратуры. Применяя для измерения M_1 аппаратуру с достаточно узкой полосой пропускания частот, можно достичь (в принципе) сколь угодно высокой чувствительности.

Для экспериментальной проверки изложенных выше соображений было проведено исследование дисперсии продольных акустических волн в тонкой проволоке ($r \ll \lambda$, где r — радиус проволоки, λ — длина волны). В этом случае теория приводит к формуле

$$D = \frac{3}{4} \frac{\sigma^2 r^2 \omega}{c^3}, \quad (8)$$

где σ — коэффициент Пуассона.

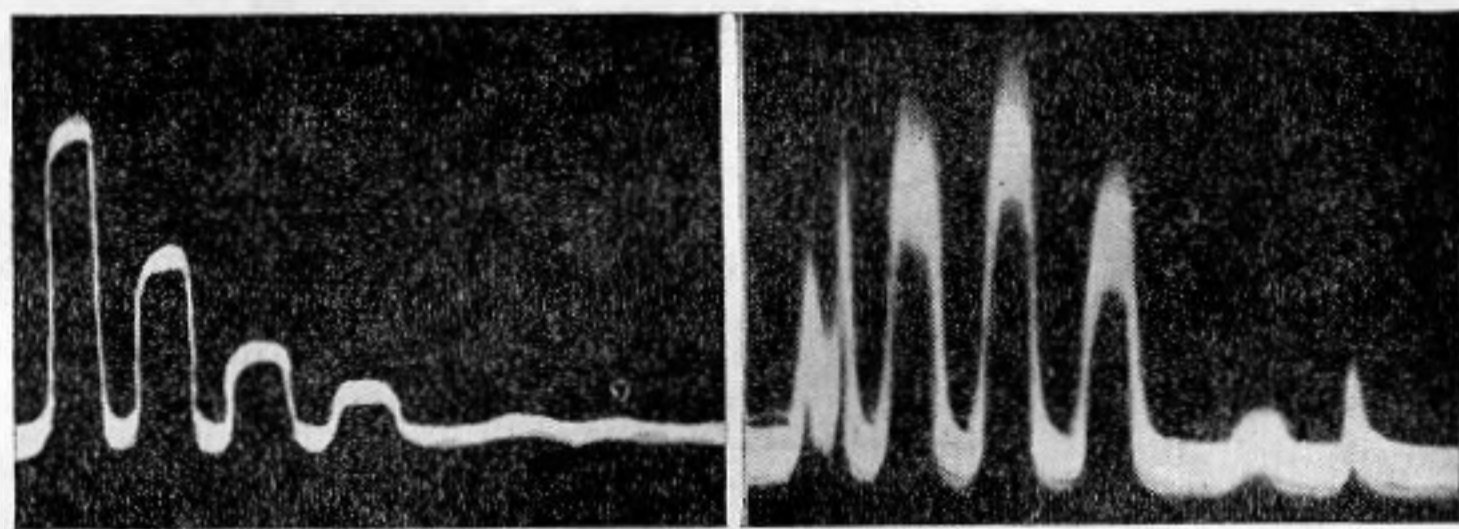
Наши эксперименты проводились с никелевой проволокой радиуса, 0,4 мм при $\omega_0 = 2\pi \cdot 10^6$ 1/сек; $\Omega = 2\pi \cdot 10^5$ 1/сек. Скорость звука c по нашим изме-



Фиг. 1. 1 — генератор модулированного колебания, 2 — передающая катушка, 3 — приемная катушка, 4 — усилитель, 5 — детектор I, 6 — фильтр на частоту модуляции, 7 — детектор II, 8, 9 — осциллоскопы

рениям была $5,3 \cdot 10^5$ см/сек. Выбор материала проволоки обусловлен наличием у него сильного магнитоэлектрического эффекта, использовавшегося для возбуждения и приема акустических колебаний.

Блок-схема эксперимента изображена на фиг. 1. Модулированные колебания в виде импульсов подаются с генератора I в катушку 2. Здесь они излучаются одновременно по направлению к концам P и Q. Каждый раз, как импульс, испытав отражение, проходит через катушку 3, он воз-



Фиг. 2. Картины на экранах осциллоскопов: а — после детектора I, б — после детектора II

буждает в ней э. д. с., которая воспринимается усилителем 4. Расположение катушек на проволоке было таково, что каждый последующий импульс проходил путь на 1,6 м больше предыдущего. Картина импульсов, получаемых на осциллокопе 9, приведена на фиг. 2, а. Осциллоскоп 8 включен после детектора II и фильтра, пропускающего частоту Ω . Если величина выброса на осциллокопе 9 обусловлена значением величины M_0 (3), то величина выброса на осциллокопе 8 обусловлена значением величины M_1 . Соответствующая картина приведена на фиг. 2, б. Отношение амплитуд импульсов одного номера пропорционально глубине амплитудной модуляции с частотой Ω . Если в первом импульсе она близка к нулю, то в каждом из последующих она увеличивается. Это можно объяснить изменением величины θ с ростом x благодаря дисперсии. Результаты коли-

чественных измерений находятся в полном согласии с теоретической формулой (8).

Обнаружение дисперсии в тех же условиях путем отдельного измерения фазовой скорости на разных частотах потребовало бы измерения фазовой скорости звука с относительной точностью 10^{-4} .

Изложенный выше способ измерения дисперсии применим только в случае бегущих волн. При наличии стоячей волны смена характера модуляции происходит через каждые четверть длины волны. Это обстоятельство усложняет методику проведения эксперимента, поэтому предпочтительнее проводить измерение с бегущей волной. В только что описанных экспериментах для получения бегущей волны использовался импульсный режим работы. В опытах по применению описанной методики в жидкости для получения наибольшей чувствительности использовался непрерывный режим работы, что потребовало применения такого приемника звука, который не нарушал бы режима бегущей волны. Нами применялся оптический индикатор, который представлял собой установку для наблюдения диффракции света на ультразвуке. Первый диффракционный максимум подавался на фотоэлемент, к выходу которого подключался фильтр на частоту модуляции. При слабом звуковом поле и нормальном падении светового луча на звуковой интенсивность первого диффракционного максимума пропорциональна V^2 . Перемещая световой луч, можно исследовать зависимость спектра V^2 от x и определить величину D . Эксперименты проводились в воде на частоте 1 мГц при частоте модуляции 100 кГц и имели целью определить чувствительность излагаемого метода. При этом было констатировано отсутствие дисперсии. Чувствительность установки к изменению фазового инварианта при полосе фильтра порядка 1 кГц была порядка 10^{-3} . Это соответствует величине D порядка 10^{-15} сек²/см при длине пути 10 см или изменению скорости звука на величину порядка 1 см/сек при изменении частоты на 100 кГц.

Выражаю глубокую благодарность Г. С. Горелику за ценные советы.

ЛИТЕРАТУРА

1. И. Г. Михайлов. Распространение ультразвука в жидкостях. ГИТТЛ, М., 1949.
2. F. E. Fox and T. M. Marion. Ultrasonic dispersion in water solution of magnesium sulfate. J. Acoust. Soc. Amer., 1953, 25, 4, 661—668.
3. T. King, Mc Cubbin Dispersion of the velocity of sound in water between 500 and 1500 kilocycles. J. Acoust. Soc. Amer. 1954, 26, 2, 247—249.
4. В. А. Зверев. Об одном новом методе исследования дисперсии ультразвука. Сб. работ, посвященных памяти акад. А. А. Андропова. Изд-во АН СССР, М.—Л., 1955, стр. 657—680.
5. В. А. Зверев, Модуляционный метод измерения дисперсии ультразвука. ДАН СССР, 1953, 91, 4, 791—794.

Горьковский исследовательский
физико-технический институт

Горьковского государственного университета

Поступила в редакцию
17 января 1956 г.